

УСПЕХИ УРАЛЬСКИХ УЧЕНЫХ-ТЕПЛОФИЗИКОВ В РАЗВИТИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Аннотация

В статье представлены достижения Уральской школы ученых и инженеров металлургов-теплофизиков в развитии и совершенствовании широкого спектра металлургических технологий, достигнутых на научной базе творческого союза двух наук – теплофизики и информатики. В последние годы математическое моделирование в сочетании с физическим позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемых технологий и оборудования. Модернизация агломерационных машин осуществлялась путем внедрения систем автоматического управления тепловыми и газодинамическими процессами и за счет оснащения машин зажигательными горнами нового типа. Эти мероприятия, наряду с интенсификацией тепло-массообменных процессов обеспечили улучшение технико-экономических и экологических показателей работы аглофабрик в России и за рубежом. Технологические и теплофизические решения при обжиге окатышей связаны с организацией переточной системы газовых потоков и реконструкцией газоходной системы. В результате реконструкции производительность машин увеличилась на 10–17 %, удельный расход топлива снизился на 8–15 %, а сброс газов после их очистки уменьшился на 50–58 %. Реконструкция подверглись обжиговые машины в России, Бразилии, Иране. В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ПАО «ММК». Новые воздухонагреватели дутья для доменных печей способны обеспечить нагрев до 1300 °С и более за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа.

Проблема по переработке металлургических жидких шлаков успешно решена созданием на заводах черной металлургии России, Украины, Индии и Китая установок припечной грануляции шлаков. Эти установки обеспечивают высокую производительность по скорости слива шлака от 3 до 15 т/мин., годовые объемы получения гранулированного шлака в пределах от 0,66 до 2,0 млн. т. Успешно работает подобная установка и на предприятии «Норильский никель». Совершенствование тепловых режимов и оборудования нагревательных печей и установок различного назначения опирается на математическое моделирование теплофизических процессов, основу которого составляет созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного теплообмена. Этот метод успешно развивается. За последние годы разработаны новые конструкции печей, модернизированы сотни нагревательных печей. Организация тепловых режимов их работы привела к существенному снижению удельных расходов топлива, повышению качества нагрева металла, а при термообработке – качества готовой продукции.

Ключевые слова: математическое моделирование, агломерат, окатыши, доменное производство, воздухонагреватели, жидкий шлак, нагревательные печи и установки, оснащение оборудованием.

Abstract

The article presents the achievements of the Ural scientific school of scientists and engineers metallurgists-heating engineers in improving a wide spectrum of metallurgical technology achieved on a scientific basis of the creative Union of two Sciences – physics and computer science. In recent years, mathematical modelling in combination with physical significantly reduce the time and scope of the search for optimal solutions and thereby provide more reliable design and commissioning of thermal regimes of established technologies and equipment. Modernization of sintering machines was carried out by introduction of automatic control systems of thermal and gas-dynamic processes and by equipping the cars the fiery furnaces the new type. These activities, along with the intensification of heat-mass transfer processes has improved the feasibility and environmental performance of the sinter plants in Russia and abroad. Technological and thermo-physical solutions during the firing of pellets associated with the organization of the transfer system gas flows and reconstruction gazohode system. The reconstruction performance of machines increased by 10–17 %, specific fuel consumption has decreased by 8–15 %, and discharge of the gases after their cleaning has decreased by 50–58 %. Reconstruction has undergone a roasting machine in Russia, Brazil, Iran. In recent years, software has been developed for the solution of complex problems in the domain of production, introduced into commercial operation at the largest metallurgical enterprise in Russia – PJSC MMK. New hot-blast stoves of a blast for blast furnaces are able to provide heating to 1300°C or more by the heating blast furnace gas and the air used for heating stoves at failure from supplements of natural gas. The problem of processing of metallurgical liquid slag is successfully solved by the creation of factories of ferrous metallurgy of Russia, Ukraine, India and China plants granulated slag. These plants provide high capacity of slag discharge rate from 3 to 15 t / min., as well as annual volumes of granulated slag production in the range from 0.66 to 2.0 million tons. Successfully works and installation of the company "Norilsk Nickel". Improvement of thermal modes and equipment for heating furnaces and installations for various purposes is based on mathematical modeling of thermophysical processes based on the created dynamic zonal-nodal method for the simulation of radiation and complex heat transfer This method is successfully developing. In recent years, new designs of furnaces, upgraded hundreds of furnaces. The organization of thermal modes of their operation has led to a significant reduction in specific fuel consumption, improving the quality of metal heating and during heat treatment the quality of the finished product.

Key words: mathematical modeling, agglomerate, pellets, blast furnaces, air heaters, the liquid slag waste, heating furnace and install, equipping.

Авторство первой теории металлургических печей принадлежит В.Е. Грум-Гржимайло. Его гидравлическую теорию печей [1] образно можно считать «первым камнем» в металлургическую отрасль науки, которая сегодня получила название *теплофизика*. Для того, чтобы теплофизика завоевала сегодняшние рубежи в металлургии, потребовались десятилетия упорных теоретических, экспериментальных и промышленных исследований.

Теплофизика, как наука, изучающая металлургические технологии, объединяет достаточно широкие области научных знаний: термодинамику, теорию тепломассообмена, молекулярную физику (для металлургии – теорию металлургических процессов), механику жидкости и газов, а также механику движения материалов (шихты) в печах.

Творческий союз теплофизики и информатики в последние годы обеспечил успешное совершенствование металлургических технологий. Математическое моделирование позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемой технологии и оборудования. Физическое моделирование процессов металлургических технологий с одной стороны обеспечивает математические модели необходимыми теплофизическими характеристиками – коэффициентами теплопроводности, теплоемкости, теплопередачи и пр., а с другой – адаптацию модели к конкретным производственным условиям.

Естественно, что для разработки путей повышения энергоэффективности и ресурсосбережения металлургических технологий необходимы кадры, владеющие техникой

постановки физического, как лабораторного, так и промышленного эксперимента, а также методами математического моделирования и анализа получаемых результатов. К настоящему времени сформировалась Уральская научная школа металлургов-теплотехников (теплофизиков), которая является одной из старейших в России. Ее создателем и организатором был профессор, д.т.н. Б.И. Китаев. Творческое ядро этой школы составляют выпускники кафедры «Металлургические печи» и «Металлургия чугуна» УГТУ–УПИ и в последние годы (с 1998 г.) – кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» и «Металлургия железа и стали» УрФУ. В создании и развитии научной школы активное участие принимают сотрудники ОАО «ВНИИМТ», Института металлургии УрО РАН, ОАО «Уральский институт металлов», «Уралмеханобр», «НППП ТОРЭКС», ПКБ «Энергоцветмет». Благодаря их научному творчеству достигнуты значительные результаты в области развития теории и математического моделирования теплофизических процессов, обеспечившие возможность развития и совершенствования металлургических технологий и оборудования с позиций энерго- и ресурсосбережения не только в нашей стране, но и за рубежом.

1. В области развития теории и математического моделирования теплофизических процессов

На современном этапе развития технологий одной из главных проблем является максимальное использование объёма агрегатов, теплового и восстановительного потенциалов газов и, в конечном счёте, достижение максимальной эффективности тепловой работы агрегатов в металлургии. С точки зрения этой проблемы исключительно большое значение имеет разработка теории металлургических объектов, т.е. математического описания физико-механических, тепловых и химических процессов, протекающих в этих объектах, создание математических моделей агрегатов различного назначения.

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы.

Развитие математического моделирования теплофизических процессов в металлургии связано:

- с широким использованием общей теории систем и системного анализа. Необходимость решения задач в самых разных сферах человеческой деятельности потребовала разработки приёмов, способов, подходов, которые, в конечном счёте, позволили бы разработать единую технологию исследований применительно к объектам любой природы. Общая теория систем возникла как обобщение именно тех принципов и закономерностей, которые в значительной степени могут быть применимы к объектам разной природы. Металлургическая теплотехника, или, как её сейчас называют, теплофизика и является составным элементом общей теории систем [2–4];

- с развитием и широким использованием численных методов решения задач тепломассопереноса. Аналитические решения уравнений, описывающих сложные явления тепломассопереноса в металлургических процессах получить практически невозможно. Как правило, использование только численных методов позволяет решить эти задачи. Состояние, развитие и использование численных методов решения задач тепломассопереноса представлены в работах [4–5];

- с совершенствованием моделей путём более полного учёта особенностей дутьевого, газодинамического, шлакового режимов, механики движения материалов, а также реально доступной информации о работе тепловых агрегатов металлургии, что значительно расширило возможности этих моделей [6–14];

- с появлением коммерческих пакетов программного обеспечения теплофизических расчётов. Несмотря на вполне естественные ограничения постановки граничных условий и

описания реальных металлургических объектов, существенную помощь в изучение и совершенствование технологий оказывают такие программные продукты как ANSYS различных релизов, COMSOL Multiphysics, MatLAB, Maple, STAR – CD, FlowVision, SolidWorks и другие. К сожалению, доступными в учебном процессе являются только пакеты Mathcad, Maple и MatLAB – остальные лицензионные продукты очень дороги для вузов. В научном и практическом плане отдельные пакеты являются несколько избыточными по возможностям, однако это скорее можно отнести к их недостаточной изученности;

– с использованием современных технологий и программных средств разработки программного обеспечения для управления теплофизическими процессами в металлургии [15–18]. Так, для формализации математических моделей и проектирования алгоритмического обеспечения широко используют функциональное моделирование, в основу которого положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0, а также принципы структурного системного анализа и формализации процедурно-ориентированного подхода в виде диаграмм потоков данных (Data Flow Diagram, DFD). Использование этих методов обеспечивает возможность эффективного обмена информацией по описанию и анализу модельных систем между специалистами в области теплофизики, металлургических технологий и разработчиками информационных систем. Реализация программного кода модельных систем выполняется на основе Agile-метода – гибкой методологии разработки программного обеспечения, ориентированной на использование итеративной разработки, динамического формирования функциональных требований и обеспечение их программной реализации в результате постоянного взаимодействия с пользователями системы.

2. В области подготовки железорудного сырья

2.1. Технологии производства агломерата

ОАО «ВНИИМТ» один из немногих институтов, активно сотрудничающих с УрФУ, и сохранивший свои научные возможности в области теплофизики в металлургии после развала прикладных научных организаций России. Институт, используя и развивая достижения высокотемпературной теплофизики и информатики в металлургии, обеспечивает реализацию достижений теоретической теплофизики на заводах и фабриках всего металлургического передела, начиная с теплотехнической подготовки железорудного сырья и заканчивая получением высококачественной стали и изделий из нее с самыми лучшими потребительскими свойствами. За последние годы ОАО «ВНИИМТ» разработана и реализована в промышленности теплотехническая схема агломерационной машины с установкой рециркуляции агломерационного газа и системой автоматического управления ею, устройством для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты [19] и автоматикой безопасности, способной обеспечить в рабочей зоне концентрацию СО не выше ПДК этого газа. После реализации проекта на 4-х машинах агломерационной фабрики №2 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» существенно были снижены такие показатели работы агломерационной машины, как удельный расход топлива – на 3,6–3,8 кг/т агл., содержание мелочи в выходе годного на 2,0–2,5% (абс.) и выбросы пыли и СО в окружающую среду – на 26–28 %.

Не менее эффективными оказались результаты физического и математического моделирования при создании в этом НИИ способа зажигания агломерационной шихты [20–22] и конструкций зажигательных горнов, оснащенных системами автоматического управления тепловыми и газодинамическими режимами. Исследованиям были подвергнуты агломерационные машины разных типоразмеров, эксплуатация которых связана с использованием различных видов газообразного топлива. Новые зажигательные горны обеспечивают:

- минимальный расход тепла сжигания топлива на зажигание шихты и повышение качества агломерата;
- увеличение срока эксплуатации бортов и роликов спекательных тележек, за счет их обдува вентиляторным воздухом и отсутствием водяных холодильников горна;
- уменьшенный объем топочного пространства, низкие потери тепла в окружающую среду за счет конструктивных особенностей свода горна.

Итоги этих исследований внедрены на 13 агломерационных машинах металлургических предприятий – «ЧМК», «Высокогорский ГОК», «Уральская сталь» (Россия), ОАО «Запорожсталь» (Украина), совместно с ПАО «Уралмашзавод» на ОАО «ММК» (Россия), на заводе Визакхапатнам, Бокаро (Индия) и Аксуском ферросплавном заводе (Казахстан). В результате эксплуатации горнов подобного типа экономия газообразного топлива достигла 7 кг усл. топл. /т агломерата.

Сотрудники ООО «НПВП ТОРЭКС», опираясь на математическую модель, отражающую особенности процесса спекания железорудных материалов различных месторождений, работу зажигательного горна и устройств по охлаждению готового агломерата и газодинамические характеристики агломерационной шихты и тракта агломерационных машин, предложили 3 варианта тепловых схем работы агломерационных машин с совмещенным охлаждением [23]. Эти схемы учитывают необходимость разделения отходящих с агломерационной машины газов на два, три и более потоков, которые характеризуются индивидуальными свойствами по температуре, влажности, состава газа. Один из потоков можно вернуть в агломерационный процесс, другой – использовать в энергетических целях, третий – направить в аппараты для улавливания и последующего производства отдельных элементов, таких как S, Zn и др. [23].

Их реализация на агломерационных фабриках ОАО «Северсталь», ОАО «Мечел» (Россия) и АО «ИСПАТ–Кармет» (Казахстан) подтвердили высокую эффективность этих схем. За рубежом решение подобных задач достигается в несколько иной, менее эффективной форме [24].

Значительными возможностями для анализа агломерационного процесса и разработки мероприятий с целью ресурсосбережения и улучшения энергоэффективности технологии получения агломерата обладает модель, названная трехмерной математической (динамической) моделью процесса агломерации [25–27]. В этой модели учтены все основные теплофизические явления, отражающие особенности практически всех этапов технологии производства агломерата. Расчеты процесса агломерации с использованием этой модели, как отмечают авторы «по точности и объему его описания превосходят все локальные балансовые методики и известные комплексные модели» [27, с.8.]. Теплофизический анализ работы агломерационных машин на основе результатов математического моделирования позволил получить технические решения для проектирования, реконструкции агломерационных фабрик в нашей стране и за рубежом (Украине, Казахстане, Индии, Югославии, Египте, Венгрии, Иране, Алжире). Примером может служить совершенствование технологии спекания и реконструкция агломерационной машины №7 на агломерационной фабрике №2 металлургического завода «Арселор Миттал Темиртау». В результате внедрения технических решений производительность машины увеличилась на 30 %.

Положительный эффект при совершенствовании технологии производства агломерата может быть достигнут в результате наложения акустического поля на слой спекаемой шихты. Оценку влияния энергии акустического поля произвели сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» в процессе исследований на укрупненной лабораторной установке типа «Аглочаша» и в промышленных условиях на агломерационной машине аглофабрики ОАО «Серовский металлургический завод» [28]. Акустические излучатели, представляющие собой волноводы трубчатой конструкции (свистки Гартмана), устанавливали в первых двух вакуум-камерах. При этом давление компрессорного воздуха составляло 3,0 атм., а общий расход компрессорного воздуха на один излучатель не превышал 50 м³/ч. При исследовании влияния энергии акустического поля на слой шихты все технологические операции, как и состав шихты, соответствовали традиционной технологии.

Образующееся акустическое поле вовлекает в колебательный процесс колосниковую решетку, пронизывает нижние горизонты обрабатываемой агломерационной шихты (сырой и высушиваемый слой), достигает зоны горения и расплавления. Частицы слоя и пыли также вовлекаются в колебательный процесс, в результате этого в поровых каналах на поверхностях твердых компонентов слоя уменьшается толщина пограничного слоя и усиливаются массообменные процессы. При этом происходит разрыхление слоя мелкодисперсных частиц,

благодаря чему появляются условия по увеличению расхода газа для тепловой обработки слоя шихты, что дополнительно активизирует развитие и тепловых, и массообменных процессов в слое шихты с одновременным уменьшением выноса пыли за счет ее осаждения в самом слое шихты и за его пределами – в вакуум-камерах.

Промышленные испытания при установке в вакуум-камерах акустических излучателей суммарной мощностью звука $1,0\text{--}1,2 \text{ кВт/м}^2$, перекрывающих акустическим полем не более 15–20 % площади спекания агломерационной машины, а также в объеме сборного коллектора со стороны его торца при мощности звука $0,3\text{--}0,4 \text{ Вт/м}^3$ показали рост производительности в пределах 3,2–8,3 %, снижение запыленности агломерационных газов на 29,2–36,2 % и концентрации монооксида углерода в них на 26,7–33,4 %.

Подобные результаты по энергоэффективности и выбросам в окружающую природную среду могут быть получены и в технологиях обжига окатышей.

Улучшение показателей процесса агломерации железорудного сырья может быть достигнуто, если будут обеспечены одинаковые температурно-временные условия спекания по высоте слоя агломерируемой шихты. С целью создания теплового режима, способного удовлетворить этим условиям, на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны способ и конструкция устройства для совместного сжигания твердого и газообразного (комбинированного) топлива в слое агломерируемой шихты, а также проведены испытания этого способа в промышленных условиях [29].

Специальное устройство для подачи в надслоевое пространство природного газа и воздуха для его горения – газо-воздушно-распределительное устройство (ГВРУ), устанавливается за зажигательным горном. К этому времени в спекаемом слое уже сформировалась устойчивая зона горения твердого топлива. После смешения газовых сред в надслоевом пространстве между ГВРУ и поверхностью слоя шихты образовавшаяся газо-воздушная смесь, проходя через горячий слой агломерата верхнего горизонта слоя шихты, подогревается до температуры воспламенения ($450\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$) с образованием активной зоны горения протяженностью 40–60 мм с температурами $1100\text{--}1150 \text{ }^\circ\text{C}$. Выделяемая при этом теплота обеспечивает дополнительный подогрев верхних горизонтов слоя до требуемой температуры спекания шихтовых материалов.

Промышленные испытания разработанной конструкции ГВРУ проведены на агломерационной машине Серовского металлургического завода. В ходе исследований было установлено, что при использовании комбинированного топлива в слое происходит выравнивание температурно-временных условий нагрева в объеме слоя шихты, как по его высоте, так и ширине. При увеличении доли природного газа на ГВРУ до 40 % от его общего расхода повышается производительность агломерационной машины на 30–35 % и сокращается выход мелких фракций в барабанной пробе.

2.2. Технологии производства окатышей

Качеству железорудных окатышей, как перспективному виду металлургического сырья для доменных печей и для альтернативных технологий получения железа в последние годы уделяется повышенное внимание. Изучению теплофизических процессов, формирующих конечный продукт, уделяется много внимания как в нашей стране [30, 31], так и за рубежом [32].

С целью устранения неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшения качества окатышей на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны устройства для сжигания газа в слое и тепловые схемы обжиговых конвейерных машин и проведены испытания этого способа в промышленных условиях. Так как при технологии сжигания газа в слое появляется еще один источник тепловой энергии, дополняющий основной, расположенный в зоне обжига, то такой технологический способ обжига получил название комбинированного [33].

Технология такого способа обжига окатышей организуется в следующей последовательности: сушку и подогрев слоя окатышей осуществляют также, как описано выше, а обжиг окатышей верхних горизонтов при температуре $1200\text{--}1300 \text{ }^\circ\text{C}$ на глубину 75–100 мм ведут просасываемыми продуктами факельного сжигания газа в горновом

пространстве. После этого в слой подают холодную газо-воздушную смесь (коэффициент расхода воздуха $\alpha = 3,0 - 5,0$), которая, проходя через нагретый материал, подогревается до температуры воспламенения. При этом начинается устойчивый процесс горения газа в слое. Продукты горения газо-воздушной смеси проходят через нижележащие слои окатышей и нагревают их. По мере нагрева окатышей до температуры, при которой происходит воспламенение газо-воздушной смеси, процесс горения распространяется ниже, что обеспечивает равномерный нагрев окатышей до заданной технологической температуры по всей высоте слоя.

Реализация комбинированного способа обжига окатышей на двух обжиговых конвейерных машинах Качканарского ГОКа показала надежность использованного газогорелочного устройства, обеспечившего устойчивое и безопасное сжигание газа в слое окатышей. Новая технология термообработки шихты по сравнению с технологией обжига окатышей без сжигания газа в слое, наряду с устранением неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшением качества окатышей, обеспечила увеличение производительности агрегатов на 10–12 %, снижение расхода природного газа на 10–15 %, электроэнергии на 6–8 % [33].

Разработанные специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС» и реализованные в новой тепловой схеме МОК–1–592 МГОКа основные технологические и теплофизические решения [34, 35] связаны с организацией 3-х-секционной зоны сушки [36, 37], переточной системы газовых потоков и реконструкцией газоходной системы. Решения затронули реконструкцию оборудования новой обжиговой машины МОК–1–592, которая введена на Михайловском ГОКе. В результате реконструкции производительность машины увеличилась на 10–17 %, удельный расход топлива снизился на 8–15 %, а общий сброс газов в атмосферу после их очистки уменьшился на 50–58 %. Реконструкция также проведена на обжиговых машинах №1 и №2 ПАО МГОКа [37, 38]. Опыт и технико-экономические показатели работы обжиговой машины четвертого поколения послужили примером для реконструкции всех обжиговых машин металлургических предприятий России. Более того, к подобной реконструкции не только проявили интерес и за рубежом – в Бразилии, Иране, но и активно в настоящее время ведутся реконструктивно-монтажные работы под руководством специалистов ООО «НПВП ТОРЭКС».

Глубокие научные исследования по обжигу окатышей организованы и в ОАО НИИМТ – «ВНИИМТ». Сотрудниками этого НИИ научно обоснован, разработан и внедрен комплекс новых технических решений на ОКМ АО «ССГПО», позволивший увеличить ее производительность на 24,6 %, уменьшить расход природного газа, более чем в 2 раза, и электроэнергии на привод тягодутьевых установок на 21,3 %, а также снизить техногенное давление на окружающую среду благодаря установке газоочисток на газопотоках, сокращению расходов топлива и электроэнергии, что позволило приблизить показатели ее работы к уровню лучших современных обжиговых машин [39, 40].

3. В области доменного производства

Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий УрФУ [41–51] тесно связана с доменным цехом ПАО «ММК». В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ПАО «ММК». Результаты этой работы включают:

- интегрированный пакет прикладных программ автоматизированного рабочего места инженерно-технического персонала доменной печи;
- интегрированный пакет для инженерно-технического персонала доменного цеха;
- программное обеспечение для моделирования технологических процессов и аналитической оценки отчетных показателей работы доменного цеха;
- комплекс программ распознавания образов для прогноза теплового состояния технологических процессов в металлургии (на примере доменной плавки);
- пакет программ для оптимального распределения природного газа и технологического кислорода в группе печей;

- пакет программ выбора поставок сырья и оптимального состава шихт в аглодоменном производстве;
- программное обеспечение для управления объектами в металлургии во время их пуска (на примере пуска доменной печи);
- программное обеспечение для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки при использовании пылеугольного топлива.

Внедрение современной информационно-моделирующей системы позволило повысить эффективность принятия решений инженерно-техническим персоналом цеха в условиях нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья, топливно-энергетических ресурсов и изменениях в конъюнктуре рынка. Программное обеспечение при использовании пылеугольного топлива предназначено для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки и решения комплекса технологических задач.

Кафедрой «Металлургии железа и сплавов» того же института на основе современных представлений о закономерностях тепло и массообмена (с учетом термодинамики и кинетики поведения оксидов примесных элементов) разработана математическая модель теплового состояния нижней зоны доменной печи, позволяющая рассчитывать распределение температурных полей газа, кокса, шлака и чугуна по высоте печи. С использованием этой модели выполнен комплексный анализ восстановления примесей из оксидов в чугун. Это позволило реализовать выплавку чугуна из ванадийсодержащих титаномагнетитов с содержанием кремния в чугуне менее 0,1 %, реализовать комплекс мероприятий, обеспечивающих подавление процессов образования карбидов титана и оптимизировать шлаковый режим [52–55]. Реализация этих мероприятий позволила снизить удельный расход кокса более чем на 10 кг на тонну чугуна и достигнуть удельной производительности более 3,0 т/м³.

В Институте металлургии УрО РАН разработана методика [56] оценки влияния металлургических характеристик железорудного сырья (восстановимость, прочность, температуры размягчения и плавления) на технико-экономические показатели доменной плавки, в основе которой лежат математические модели доменного процесса [57, 58]. Эта методика использована для совершенствования технологии переработки железорудной базы черной металлургии, а также для ее расширения. Этим институтом совместно с Институтом горного дела УрО РАН предложена схема раздельной добычи низкотитанистых и высокотитанистых руд Гусевгорского месторождения [59]. Имет УрО РАН совместно с АО «ЕВРАЗ КГОК» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» выполнены работы по повышению качества агломерата и снижению расхода кокса в доменной плавке [60], а совместно с ОАО «Уралмеханобр» предложена технология переработки титаномагнетитовых руд Тебинбулакского месторождения (Республика Узбекистан) по схеме «доменная печь – конвертер» [61]. Успешно на пяти доменных печах Китая работает, разработанная в институте система мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи [62], которую планируется внедрить и на одной из доменных печей ПАО «ММК».

4. Доменные воздушнонагреватели

Устойчивая тепловая работа доменных печей, которая определяет их производительность и удельный расход кокса, зависит от многих факторов. Одним из главных среди них является использование высоко нагретого дутья. В последние годы широкое распространение для нагрева доменного дутья получили воздушнонагреватели бесшахтного типа Калугина (ВНК). Сегодня на металлургических заводах мира – России, Украины, Казахстана, Бразилии, Индии, Индонезии, Китая, Сирии, Турции, Чешской республики и Японии работает 211 ВНК, обеспечивая доменные печи горячим воздушным дутьем, температурный уровень которого достигает 1000–1150 °С, а на некоторых заводах России и Китая температуру воздушного дутья удалось увеличить до 1200–1250 °С [63]. Еще 39 воздушнонагревателей этого типа находятся либо в стадии строительства, либо в стадии проектирования.

Исследователи доменного процесса указывают на целесообразность нагрева дутья до 1300 °С и более. Реализация такого предложения способна обеспечить достижение этой цели,

что приведет к значительному экономическому эффекту. Об этом свидетельствует теплофизический анализ, выполненный ЗАО «Калугин», который показал реальную возможность достижения указанных температур, если под куполом воздухонагревателя Калугина (ВНК) поддерживать температуру на уровне 1430°C за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа к доменному газу. Технологически это достигается с помощью компактных теплообменников – *термосифонов*, устанавливаемых в боровых перед дымовой трубой. Подобные тепло-утилизационные аппараты требуют на установку и эксплуатацию меньше финансовых средств, чем затраты на добычу топлива, его переработку и доставку к металлургическим предприятиям с последующим использованием в виде топливных добавок к доменному газу – основному виду топлива при нагреве насадки воздухонагревателя [64].

Для подтверждения энергоэффективности подобных решений проведено исследование рабочего цикла «нагрев насадки – нагрев доменного дутья» для условий работы доменной печи объемом 2700 м³, выплавляющей обычный чугун. Производительность доменной печи обеспечивается подачей дутья, расход которого составляет 5400 м³/мин. Для базового периода температура дутья принята 1250 °С, доменный газ и воздух для нагрева ВНК не подогреваются, а расход природного газа для обогащения доменного газа составил более 5600 м³/ч. Для перспективного периода может быть организован подогрев до 200°C доменного газа и воздуха для отопления ВНК продуктами горения с температурой 300 °С без добавок природного газа. В этих условиях температура купола ВНК составит 1430 °С, а нагрев доменного дутья – 1310 °С. Следует подчеркнуть, что для перспективного периода достигается экономия топлива на нагрев 1000 м³ дутья, величина которой несколько превышает 2,0 %. В условном топливе годовая экономия составляет 4210,7 тонны.

Компанией ЗАО «Калугин» накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению, монтажу и вводу в эксплуатацию теплообменных аппаратов на термосифонах. Этот опыт обеспечивает в настоящее время успешную работу систем утилизации тепла на термосифонах, установленных на 48 доменных печах России и Китая [65].

5. Переработка жидких шлаков и расплавов

В этом направлении развития теплофизики ОАО «ВНИИМТ» является одним из первых как в России, так и за рубежом.

Коллективу ОАО «ВНИИМТ» удалось решить на мировом уровне сложную теплофизическую проблему по переработке жидких шлаков черной и цветной металлургии, используя для этого достижения теплофизики и ее главных разделов – теплообмена и гидродинамики. Главными на этом пути были задачи распыления шлака и организация движения охлажденной шлаковой пульпы. При изучении теплообменных процессов дробления и охлаждения струи жидкого расплава водой были установлены удельные расходы воды и предельные размеры частиц шлака. Даже значительное количество чугуна, которое может быть увлечено из печи шлаком, не создает взрывоопасной обстановки: чугун под воздействием струй воды также подвергается дроблению на мелкие капли, причем каждая из них располагает незначительным запасом тепла, которое не способно вызвать парообразование взрывного характера. Изучение гидродинамических явлений, связанных с движением шлаковой пульпы, привели к разработке эрлифтной транспортной системы. Исследования в итоге привели к созданию в комплексе оборудования доменной плавки установки припечной грануляции жидкого шлака [66] Эта установка обеспечивает:

- более благоприятные санитарные и гигиенические условия труда;
- относительно простое управление, возможность полной автоматизации работы установки;
- полную переработку всего шлака доменной плавки в продукт высокого качества для цементной промышленности;
- локализацию вредных парогазовых выбросов и их организованное удаление;
- нейтрализацию сернистых соединений, содержащихся в парогазовых выбросах;
- взрывобезопасное получение высококачественных гранул;
- дробление и охлаждение шлакового расплава оборотной (слабо осветленной) водой;

- эвакуацию загущенной шлаководяной пульпы надежным, абразивостойким, эрлифтным способом;
- обезвоживание шлаководяной пульпы в непрерывно действующем агрегате карусельного типа;
- подсушку гранулированного шлака за счет его физического тепла.

Анализ работы этих установок на металлургических заводах России, Украины, Индии, Китая подтвердил высокую их производительность по скорости слива шлака от 3 до 15 т/мин. и по годовым объемам переработки шлаков – от 0,66 до 2,0 млн. т [67]. Длительной эксплуатацией установок была подтверждена их полная взрывобезопасность. Накопленный опыт грануляции жидких шлаков в черной металлургии был с успехом использован при проектировании, строительстве и эксплуатации подобной установки в цветной металлургии на ПАО ГМКЗФ «Норильский никель» [68]. В настоящее время коллектив ОАО «ВНИИМТ» является основным разработчиком подобных установок для доменных печей объемом 2000–6000 м³ [67].

Жидкий шлак обладает высокопотенциальным физическим теплом, утилизация которого является актуальной научно-технической проблемой. В настоящее время в ОАО «ВНИИМТ» разработана и опробована технология и установка для сухой грануляции шлакового расплава, основанная на кристаллизации жидкого шлака твердым теплоносителем. Эта технология готова к внедрению на металлургические предприятия.

6. В области газо-печного хозяйства

Особое внимание на кафедрах университета и ОАО «ВНИИМТ» уделяется математическому моделированию теплофизических процессов в рабочем пространстве нагревательных печей и установок различного назначения. Так, созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного высокотемпературного теплообмена продолжает успешно развиваться [69]. Осуществленное совместное УрФУ и ОАО «ВНИИМТ» математическое моделирование процессов нагрева труб и трубных заготовок в секционных печах Северского трубного (СТЗ) и Первоуральского новотрубного (ПНТЗ) заводов подготовило научную основу реконструкции этих печей. На реконструированных печах достигнуто снижение удельных расходов топлива (на 15–20%), увеличена производительности печей на 20–30% и снижена эмиссии оксидов азота. Метод был испытан в Институте технологий газа (США) с положительным результатом [70] и в настоящее время получил во всем мире широкое распространение с аббревиатурой – DFI-method (Direct Flame Impingement Heating method).

Этот перечень внедренческих работ может быть продолжен:

- на термических печах ПНТЗ внедрены прогрессивные режимы термообработки труб, непосредственное измерение температуры металла и управление газодинамикой рабочего пространства печей, а на кольцевых печах СТЗ для увеличения срока их службы установлены ребристые подины [70];
- разработан и внедрен модельный метод экспертной системы доменной печи [71];
- продолжали также развиваться методы энерго-экологического анализа процессов с определением технологических топливных чисел (ТТЧ), вредных и парниковых выбросов, с использованием этих методов выполнен анализ целого ряда металлургических процессов [72];
- проанализированы коксовые и бескоксовые металлургические технологии и разработаны рекомендации по развитию технологий с наименьшими энерго-экологическими выбросами. В частности, проработан в деталях ЛП-процесс (процесс прямого легирования стали ванадием), элементы которого нашли применение как в нашей стране, так и за рубежом при сокращении потерь ванадия в 3–4 раза [73, 74].

Так исторически сложилось, что сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», развивая исследования по нагреву и охлаждению металла, традиционно уделяют внимание совершенствованию конструкций и тепловых режимов нагревательных печей. Эта работа проводится совместно с проектными и исследовательскими организациями, что обеспечивает и проектирование, и строительство тепловых агрегатов по новейшим технологиям. Уделяется также серьезное внимание решению задач по улучшению

энергоэффективности тепловых режимов за счет внедрения новейших газовых горелок скоростного типа с глубокой утилизацией тепла отходящих из печи продуктов горения, благодаря чему достигается экономия до 50 % природного газа по сравнению с аналогичными показателями работы печей устаревших конструкций [75].

Активная научная деятельность сотрудников кафедры с научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» (Екатеринбург) может быть проиллюстрирована следующими результатами:

- на заводе ОЦМ в г. Кирове построены по новым технологиям и запущены в эксплуатацию две толкательные и одна с шагающим подом методические печи для нагрева слябов (2–5 т) из медных сплавов. Для футеровки печи использованы волокнистые блоки. Печи оснащены современными скоростными горелками и комплексной системой автоматического управления тепловым режимом [76];

- на заводе металлоконструкций (г. Кашира, Московская область) спроектирована и построена уникальная камерная термическая печь с применением современных волокнистых футеровок и скоростных рекуперативных горелок. Уникальность этой печи заключается в том, что она создана с изменяющейся геометрией рабочего пространства в зависимости от объема нагреваемой заготовки, что обеспечивается устройством выкатного пода, который может перемещаться на расстояние до 60 метров [77];

- на Уралмашзаводе (г. Екатеринбург) построена и введена в эксплуатацию вертикальная термическая печь для обработки длинномерных крупногабаритных изделий машиностроения переменного поперечного сечения (роторы турбин, валки прокатных станов). Эта печь футерована современными блочными керамоволокнистыми материалами. На печи установлены скоростные рекуперативные горелки. Контроль и управление тепловыми режимами термической обработки металлоизделий полностью обеспечивается комплексной автоматизированной системой. В тепловом режиме работы печи реализована новая более совершенная технология охлаждения изделий после их нагрева в печи до технологически заданных температур. Охлаждение металла обеспечивается с помощью воздуха, поступающего от вентилятора в печь через рекуперативные горелки. Такой цикл системы охлаждения связан с непрерывным снижением температуры металла и соответственно воздуха. В результате такого «мягкого» охлаждения исключается возможность образования в изделиях термических напряжений, способных вызвать появление трещин [78, 79].

Широкого внедрения комплексных систем автоматического управления тепловыми режимами печей удалось достичь за счет разработки математических моделей для каждой технологии нагрева металлоизделия и в случае необходимости – его охлаждения, в результате чего организация технологических процессов нагрева металла осуществляется без участия человека. Реализованные на всех агрегатах новые тепловые режимы привели к значительному снижению удельных расходов газа (до 50 %) и сокращению выбросов парниковых газов, среди которых наибольшую опасность представляют загрязнители атмосферы – CO, NO, N₂O, NO₂, SO₂ и др.

Не менее успешной является деятельность творческих коллективов ОАО «ВНИИМТ» и УрФУ, связанная с разработкой комплекса мероприятий по модернизации металлургических печей различного назначения. Основными из них являются: выбор регенеративной или рекуперативной системы отопления с соответствующими горелочными устройствами, определение оптимального числа зон теплового регулирования, применение для футеровки керамоволокнистых материалов, оптимизация размеров рабочего пространства (в основном, высота свода), контроль состава продуктов горения по зонам и в боровых, автоматизация систем управления на базе программируемых контроллеров, моделирование и расчетный анализ для разработки и внедрения рациональных температурно-тепловых режимов работы печей [80]. При термообработке металлов достаточно часто применяются электрические печи. Использование электрической энергии имеет свои преимущества, но вместе с тем и более высокие показатели по расходам энергии. Себестоимость электронагрева в 1,5–2 раза, а капитальные затраты в 7–8 раз выше, чем при газовом нагреве. Институт накопил опыт перевода печей с электрического обогрева на газовый.

Научно-исследовательский институт ОАО «ВНИИМТ» значительное внимание уделяет изучению теплофизических процессов горения газообразных видов топлива. Достижения в этом направлении используются для разработки и сертификации различных видов газогорелочных устройств, как по видам газообразного топлива, так и по области их применения. Созданная в институте рекуперативная горелка превосходит по основным показателям работы (температуре подогрева воздуха и расходу воздуха на отсос дымовых газов) известные зарубежные аналоги [81]. Рекуперативные горелки применяются при температуре греющих газов печи не более 1000–1050 °С. Сотрудники этого института разработали и освоили производство малогабаритных регенеративных горелочных устройств, используемых в печах различного назначения. Первая отечественная камерная печь, на которой были установлены эти горелки, была сооружена на заводе в Верхней Салде (ВСМПО) в 2000 г. [82]. Процесс управления работой горелок полностью автоматизирован. Экономия топлива (природного газа) при этом составила 55 %. Всего выполнены и реализованы более 10 проектов реконструкции для печей различного назначения.

Роль достижений теплофизики в создании новых технологий и устройств в области термической обработки изделий из металлов и сплавов трудно переоценить. Особенно это связано с необходимостью подвергать термической обработке изделия разной термической массивности, формы, добиваясь при этом получение высоких механических свойств. Традиционные способы объемной закалки изделий в водяных, масляных, селитровых и щелочных баках не способны обеспечить для них требуемые заказчиком показатели прочности, структуры и т.п. Новые технологии ОАО «ВНИИМТ» регулируемого высокоскоростного водо-воздушного охлаждения опираются на закономерности изменения температурного поля на поверхности изделия (конвективный теплообмен) и внутри его (теплообмен теплопроводностью). Таким образом, контролируются температурные напряжения в изделии. Управление скоростями охлаждения различных элементов изделия в широком диапазоне температур осуществляется изменением плотности водо-воздушного орошения, которую можно менять в цикле термообработки, не допуская развития нежелательных явлений (по механическим свойствам, структуре и пр.). Активная работа по разработке и внедрению технологий водо-воздушного охлаждения проводится металлургами-теплотехниками ОАО «ВНИИМТ» в содружестве с работниками заводов и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ [83]. Водно-воздушные технологии с успехом внедрены при термообработке различных видов проката – железнодорожных колес, рельсовых накладок и подкладок, листа из различных сплавов, труб, подшипниковых колец из стали ШХ–15, изделий машиностроения. Технология упрочнения листовой стали на стане 5000 «Северсталь» не имеет аналогов в мировой практике. Термообработка по такой технологии рельсовых накладок [84] позволяет повысить их прочностные характеристики в 3 раза, твердость – в 1,2–2,5 раза, длительность эксплуатации на железнодорожных путях в 2–5 раз [85]. Столь значительные успехи обусловлены тем, что теплофизические возможности водо-воздушного охлаждения обеспечивают оптимальные условия охлаждения изделий различной термической массивности, не допуская возникновения опасных термических напряжений, а также значительное снижение себестоимости термообработки за счет отказа от использования таких закалочных средств, как масло, селитра и отказа от применения различных моечных агрегатов. Являясь перспективной, экологически безопасной технологией [86], эта технология активно и плодотворно развивается.

ОАО «ВНИИМТ» и кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ активно сотрудничают в развитии теплофизики металлургических технологий и в других областях металлургии, что проявляется либо в разработке новых технологий, либо в существенном совершенствовании традиционных:

- в технологиях сушки измельченных сырьевых материалов достигнуты значительные успехи. Например, технология сушки сыпучих материалов с использованием твердого теплоносителя позволяет сократить время сушки от 10 до 20 раз, что обеспечивает компактность оборудования также до 10 раз [87];

– новая технология металлизации железорудного концентрата и руды в измельченном состоянии с использованием электрической дуги обладает преимуществами перед известными технологиями благодаря компактности, исключению переделов окомкования и обжига окатышей, а также разделению металла и шлака [88];

– новые технологии сушки футеровки чугуновозных, сталеразливочных и других типов ковшей и стенды для их реализации разработаны на основе теплофизического анализа процессов нагрева и охлаждения футеровки. Благодаря научному подходу к решению проблемы стойкости футеровки достигнуто двух – трехкратное увеличение срока службы ковшей при 5–10 кратном снижении расхода топлива [89];

– усовершенствованы установки металлизации окатышей по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате. В результате модернизации увеличена их производительность от 15 до 50 % и снижен расход природного газа на 5–7 % [90];

– технология и установка для переработки замасленной окалины реализована на Синарском трубном заводе. Получаемый продукт по своей себестоимости в 2–2,5 меньше себестоимости рудного концентрата без учета положительного экологического эффекта [91].

Выводы. Область теплофизики, охватывающая технологии черной и цветной металлургии, активно развивается в направлениях:

– математического моделирования характерных для металлургии тепловых и массообменных процессов с учетом особенностей движения газа и материалов;

– физического моделирования процессов металлургических технологий для определения необходимых параметров, используемых при математическом моделировании, как при разработке математических моделей, так и при их адаптации в ходе исследований промышленных технологий;

– изучения развития процессов различных металлургических технологий, что необходимо для более глубокого их понимания;

– анализа металлургических технологий с позиций энергоэффективности, ресурсосбережения и снижения техногенного давления на окружающую природную среду;

– разработки мероприятий по совершенствованию металлургических технологий и оборудования, обеспечивающих улучшение технико-экономических и экологических показателей после их внедрения в производство;

– создание научной базы для разработки систем управления технологическими процессами.

Научные и промышленные исследования последних лет, основу которых составляют достижения теплофизики, обеспечили значительное улучшение показателей работы металлургических технологий по качеству получаемых продуктов, по производительности агрегатов, по удельному расходу топлива, по выбросам парниковых газов, а также по вовлечению в современные технологии вторичных ресурсов различного происхождения. Об этом свидетельствуют успехи исследователей Уральской школы металлургов теплофизиков (теплотехников), представленные материалами как данной статьи, так и других статей этого сборника трудов. В заключение важно отметить, что результаты развития теплофизики в области металлургии обогащают знаниями и студентов – будущих работников отрасли.

Список использованных источников

1. Грум-Гржимайло В.Е. Пламенные печи (в трех томах) / В.Е. Грум-Гржимайло. – М.: Издание теплотехнического института имени профессоров В.И. Гриневецкого и К.В. Кирша, 1925. – 104 с.

2. Швыдкий В.С. Математические методы теплофизики. Учебное пособие / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, В.С. Шаврин. – М.: Машиностроение–1. 1-е изд., 2001. – 232 с., 2-е изд., 2005. – 231 с.

3. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.

4. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон. – М.: «Интермет-Инжиниринг», 1999. – 520 с.
5. Методы численного решения инженерных задач / В.С. Швыдкий, В.Я. Дзюзер – Екатеринбург, 2010. – 396 с.
6. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
7. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
8. Frolov Y.A., Polotsky L.I. Mathematical three-dimensional and dynamic model of sintering process and its use in theoretical and practical purposes / The 6th International Congress on the Science ICSTI. October 14th to 18th. 2012. Rio de Janeiro. Pp. 1447–1459.
9. Steady heat transfer in melt-irrigated blast-furnace zone / Yu.G. Yaroshenko, V.S. Shvydkii, N.A. Spirin, V.V. Lavrov // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No 2. Pp. 88–92.
10. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2016, т. 59, № 6. – С. 424–430.
11. Mathematical model of layered metallurgical furnaces and units / V.S. Shvydkiy, N.A. Spirin, V.V. Lavrov. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Volume 150 (2016). P. 012013.
12. . Gazification of coal dust particles in the blast furnace tuyere apparatus / V.S. Shvydky, Yu.G. Yaroshenko, N.A. Spirin, V.V. Lavrov. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Volume 150 (2016). P. 012021.
13. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. – С. 634–638.
14. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 / Е.А. Девярых, Н.А. Спирин, А.Р. Фатхутдинов, Т.О. Девярых, В.С. Швыдкий // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. – С. 19–23.
15. Проблемы создания современных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии / В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, Н.А. Спирин, В.В. Лавров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 10. – С. 61–65.
16. Principles of the development and introduction of an automated process control system for blast-furnace smelting at the Magnitogorsk metallurgical combine / V.Y. Rybolovlev, A.V. Krasnobaev, N.A. Spirin, V.V. Lavrov // Metallurgist. 2015/ Vol.59. No.7. Pp. 653–658.
17. Современные принципы построения и реализации информационно-моделирующих систем в металлургии (на примере доменного производства): достижения и проблемы. Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.В. Лавров // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей. Сборник трудов международной научно-практической конференции. – М.: Изд. Дом МИСиС. 2016. С.166–168.
18. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 465 с.
19. Пат. 2432538 РФ. Устройство для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты на агломерационной машине / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.10.2011. Бюл. №30.
20. Пат. 2275435 РФ. Способ зажигания агломерационной шихты, перемещающейся на спекательных тележках. Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.04.2006. Бюл. №12.

21. Разработка и внедрение нового зажигательного горна для агломерационных машин / А.А. Винтовкин, В.А. Чистополов, А.В. Чистополов, В.В. Деньгуб // Сталь. 2015. №3. – С. 6–8.
22. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов, Н.А. Спирин, В.А. Чистополов // Сталь. 2010. №3. – С. 12–14.
23. Клейн В.И. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / В.И. Клейн, Г.М. Майзель, Ю.Г. Ярошенко, А.А. Авдеенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. 2004. – 224 с.
24. Akiyama Y. Development of gas fuel injection technology in iron ore sintering process (reduction of CO₂ emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines) / Y. Akiyama, N. Oyama, Y. Ivami and others // The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil, p. 1043–1055.
25. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть I // Metallurg. 2014. №12. – С. 42–47.
26. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть II // Metallurg. 2015. №1. – С. 27–31.
27. Фролов Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология. – М.: Metallurgizdat, 2016. – 672 с.
28. Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В. Снижение пылевыноса при агломерации железных руд с использованием энергии акустического поля // Metallurg. 2016. № 4. – С. 26–30.
29. Лобанов В.И., Матюхин В.И., Гольцев В.А. Теплотехнические и технологические аспекты использования слоевого способа сжигания природного газа в металлургических агрегатах. Труды Международной научно-технической конференции «С творческим наследием Б.И. Китаева в XXI век». – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 1998. С. 122–125.
30. Абзалов В.М. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев; под ред. акад. Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург, УрО РАН, 2012. – 340 с.
31. Боковиков Б.А. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование) / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, В.М. Малкин, М.И. Найдич, А.А. Солодухин; под ред. Б.А. Боковинова. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 200 с.
32. Morales B., Contini A., Trindade L. and others // The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil, p. 61–68.
33. Лобанов В.И. Гольцев В.А. Возможности использования комбинированного способа сжигания природного газа при обжиге железорудных окатышей на обжиговой машине ОК–228 // Вестник ГОУ ВПО УГТУ УПИ №13. Металлургия и образование на Урале. Труды 1 научно-практической конференции. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. 2005. – С. 139–152.
34. Боковиков Б.А. Повышение энергоэффективности обжиговых конвейерных машин путем минимизации сбросов на дымовую трубу / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, А.А. Солодухин, Ю.Г. Ярошенко // Сталь. 2016. № 8. – С. 81–84.
35. Абзалов В.М. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения / В.М. Абзалов, В.В. Брагин, А.А. Вяткин, С.Н. Евстюгин, С.Н. Лелеко // Сталь. 2008. № 12. – С. 13–14.
36. Пат. 2350664 РФ. Способ трехстадийной сушки окатышей на обжиговой конвейерной машине / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн [и др.] // Опубл. 27.03.2009. Бюл. №9.
37. Абзалов В.М. Модернизация обжиговых машин ОК–520 ОАО Михайловский ГОК / В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, В.П. Бруев, В.Н. Неволин // Сталь. 2005. № 2. – С. 3–4.

38. Абзалов В.М. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО «Михайловский ГОК» / В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, Н.Н. Копоть, С.И. Кретов, В.Н. Неволин // Сталь. 2006. № 6. – С. 9–10.
39. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2011. № 5. – С. 4.
40. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК–108 АО ССППО для увеличения производства окатышей / А.А. Буткарев, А.П. Буткарев, В.Н. Ащеулов, П.А. Жомирук, Ю.П. Лазебная // Сталь. 2015. № 3. – С. 12–15.
41. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А.Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
42. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков; под ред. Н.А.Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.
43. Automated information system for analysis and prediction of production situations in blast furnace plant / V.V. Lavrov, N.A. Spirin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 012010.
44. Information modeling system for blast furnace control / N.A. Spirin, L.Y. Gileva, V.V. Lavrov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 012011.
45. Mathematical model and software for control of commissioning blast furnace / N.A. Spirin, O.P. Onorin, K.A. Shchipanov, V.V. Lavrov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 012012.
46. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, V.Y. Rybolovlev, A.V. Krasnobaev, A.V. Pavlov // Metallurgist. 2016. V. 1. Pp. 1–7.
47. Software for the raw-materials management system in blast-furnace smelting / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, A.S. Istomin, A.A. Burykin, K.A. Shchipanov, I.E. Kosachenko, O.P. Onorin // Metallurgist. 2015. V. 59, No. 1–2. Pp. 104–112.
48. Технологические особенности и программное обеспечение расчета задувочной шихты доменной печи / К.А. Щипанов, Н.А. Спирин, А.А. Бурыкин, И.Е. Косаченко, О.П. Онорин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 2. – С. 134–139.
49. Расчет задувочной шихты доменной печи / К.А. Щипанов, Н.А. Спирин. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612255 от 20.02.2012.
50. Assessing the shape of the viscoplastic iron-ore zone in a blast furnace / O.P. Onorin, N.A. Spirin, V.V. Lavrov, I.E. Kosachenko, V.Y. Rybolovlev // Steel In Translation. 2013. Vol.43. No.6. Pp. 335–340.
51. Simulation of heat-transfer processes and assessment of the viscoplastic parameters of iron ore in blast furnaces / V.V. Lavrov, N.A. Spirin, A.A. Burykin, O.P. Onorin, I.E. Kosachenko, A.V. Krasnobaev, V.Y. Rybolovlev // Steel In Translation. April 2013. Vol. 43. Issue 4. P. 171–175.
52. Внедрение технологии выплавки низкокремнистых чугунов на НТМК / А.В. Кушнарев, С.В. Филатов, А.А. Киричков, В.В. Филиппов, М.Р. Гильманов, В.А. Михалев, С.А. Загайнов, Б.С. Тлеугабулов, О.Н. Собянина // Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». 2011. № 3. – С. 42.
53. Technological solutions for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite / S.A. Zagainov, S.V. Filatov, O.N. Sopianina, Y.M. Gordon // Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on iron Ore, October 14th to 18th, 2012. Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Pp. 1406–1415.
54. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // Сталь. 2012. № 3. – С. 9–11.

55. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ условий движения расплава в горне доменной печи при плавке титаномagnetитов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2008. № 4. – С. 69–71.
56. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical Basis of Investigation of Influence of the Iron Ore Materials and Coke Metallurgical Characteristics on the Blast Furnace Smelting Efficiency // Advanced Materials Research. Vols. 602–604 (2013). Pp. 365–375.
57. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
58. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 163 с.
59. Дмитриев А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титансодержащих руд Урала // Бюллетень «Черная металлургия». 2015. №12. – С. 36–40.
60. The characteristic of ores and concentrates of the open society "EVRAZ KGOK" / Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V., Kornilov S.V., Pelevin A.E., Fishman A.Y., Sapozhnikova T.V., Shunyaev K.Y. // Advanced Materials Research (Vol. 834–836). 2014. Pp. 364–369.
61. Development of Metallurgical Processing Technology the Titanomagnetite Concentrate of the Tebinbulak Deposit / Dmitriev A.N., Sheshukov O.Yu., Gazaleeva G.I., Chesnokov Y.A., Bratygin E.V. Nekrasov I.V., Vitkina G.Yu. // Applied Mechanics and Materials (Vol. 670–671). 2014. Pp. 283–289.
62. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи / А.Н. Дмитриев, Ю.А. Чесноков, К. Чэнь, О.Ю. Иванов, М.О. Золотых // Сталь. 2013. №11. – С. 8.
63. Kalugin, Ya. P. High-temperature shaftless hot stoves for blast furnaces // Proc. of the 6th International Congress on the Science and technology of Ironmaking (6th ICSTI), Associacao Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineracao (ABM): Rio de Janeiro, 2012. Pp. 2774–2783.
64. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ» 2012. – 670 с.
65. Development of hot blast stove design without conventional combustion chamber / B.N. Prokofiev, M.Ya. Kalugina, Ya.A. Murzin, S.A. Ivlev, A.A. Subbotin // Proc. of METEC and the 2nd European Steel Technology and Application Days, METEC & 2nd ESTAD: Dusseldorf, 2015. P. 24 pdf 18.06.2015 12:00.
66. Пат. №101445. Установка для переработки шлакового расплава / Л.А. Зайнуллин, А.Б. Бычков, Г.И. Чеченин, В.Г. Грезнев. Оpubл. 20.01.2011. Бюл. 2.
67. Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М. 85 лет научно-исследовательскому институту металлургической теплотехники (ВНИИМТ) // Бюллетень «Черная металлургия». 2015. № 4. – С. 3–8.
68. Зайнуллин Л.А., Сухобаевский Ю.Я., Давыдов А.А. Использование установки припечной грануляции шлаков в цветной металлургии // Сталь. 2000. № 3. – С. 18–20.
69. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Интегрированный энерго-экологический анализ. Т.1. – М.: Теплотехник, 2010. – 688 с.
70. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Анализ режимных параметров и конструкций в энерготехнологиях. Т.2. Кн.2. Ч. 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 560 с.
71. Сучков А.В., Лисиенко В.Г., Сучков В.А. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.
72. Lisienko V.G., Lapteva A.V. Energy-ecological analysis and assesment of developed metallurgical technologies // 4th European Congress "Economics and Management of Energy in Industry" Portugal. Porto, Report 4, 2007. – P. 7.
73. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.

74. Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г. [и др.]. Температура: теория, практика, эксперимент. Справ. изд. в 3-х томах. Т.1, Кн.1. Методы контроля температуры; под ред. В.Г.Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2010. – 549 с.
75. Комплексная модернизация нагревательных печей / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев, Б.Н. Арсеев, А.И. Ряпосов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 12. – С. 56–59.
76. Модернизация проходной печи для нагрева медных слэбов под пластическую деформацию / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Д.М. Казяев, А.И. Ряпосов, Д.И. Спитченко // Цветные металлы. 2011. №4. – С. 85–89.
77. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. / Камерная печь с разделяющимся рабочим пространством // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 9. – С. 30–33.
78. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, Д.И. Спитченко // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. – С. 667–671.
79. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей / М.Д.Казяев, А.М.Вохмяков, Е.В.Киселев, Д.И.Спитченко, Д.М.Казяев // Труды VII Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е.Грум-Гржимайло (15–17 октября 2014 г.). – М.: НИТУ МИСиС, 2014. – С. 224–235.
80. Основы методологии модернизации конструкций и режимов работы нагревательных и термических печей / Г.М. Дружинин, М.Р. Барташ, В.А. Леонтьев, А.П. Мартынов // Сб. докладов НТК «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии». – Екатеринбург: ОАО «ВНИИМТ». 2010. – С. 44–49.
81. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах / М.Р. Барташ, Г.М. Дружинин, Н.Б. Лошкарев, А.Б. Попов // Сталь. 2010. № 3. – С. 125–127.
82. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства (история развития, теория и практика) / И.М. Дистергефт, Г.М. Дружинин, В.И. Щербинин, В.А. Савельев, С.В. Звонарёв, В.Б. Петухов // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Том 5. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – С. 44–57.
83. Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства / Ю.Г. Ярошенко, Ю.И. Липунов, М.В. Захарченко, К.Ю. Эйсмонт, Е.В. Некрасова // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. № 4. – С. 221–225.
84. Water-jet cooling in the thermal strengthening of asymmetric profiles / Y.I. Lipunov, K.Y. Eismondt, E.V. Nekrasova, E.V. Abramov, M.V. Zakharchenko, Y.G. Yaroshenko // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. № 3. Pp. 226–230.
85. Влияние технологии термоупрочнения на структуру рельсовой накладки / М.В. Захарченко, А.Ю. Желяков, Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. № 9. – С.682–687.
86. An environmentally safe method of thermal strengthening / Y.G. Yaroshenko, M.V. Zakharchenko, Y.I. Lipunov, K.Y. Eismondt, E.V. Nekrasova // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. № 4. Pp. 233–236.
87. Сушка угля твердым теплоносителем / Л.А. Зайнуллин, В.Г. Карелин, Д.А. Артов, А.Ю. Епишин, Н.А. Спирин // Металлург. № 9. 2016. – С. 23–25.
88. Высокотемпературное углетермическое восстановление сидеритовых руд в электрической дуге / Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, Д.А. Артов, В.Г. Карелин, Н.А. Спирин // Металлург. 2016. №11. – С. 31–34.
89. Опыт модернизации стенов сушки футеровки чугуновозных ковшей / В.Т. Рязанов, В.А. Хохлов, С.С. Шульгин, Ю.М. Оганесян // Сталь. 2015. № 3. – С. 39–41.

90. Опыт проведения модернизации установок металлизации по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате / Д.В. Мехряков, В.Г. Грезнев, И.В. Малей, С.В. Петров, М.Я. Фахрутдинов // Сталь. 2015. № 3. – С. 25–27.

91. Роторно-вихревые установки для тепловой обработки шихтовых материалов металлургического передела / Е.Г. Подковыркин, Н.Г. Коршунова, А.В. Баков, В.Л. Советкин, В.И. Матюхин // Сталь. 2015. № 3. – С. 98–99.

УДК 669.1.01.536.4

Б. А. Боковиков¹, В. В. Брагин¹, А. А. Солодухин¹, В. С. Швыдкий², Ю. Г. Ярошенко²

¹ ООО «НПВП ТОРЭКС», г. Екатеринбург, Россия;

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Аннотация

Описано развитие математических моделей, учитывающих всю полноту протекания теплофизических процессов при производстве окатышей. Выполнено сопоставление решения «задачи Шумана» с результатами математического моделирования тепловой работы слоя на реальной обжиговой машине. Показано, что в отличие от классической задачи, где теплообмен в слое быстро стабилизируется и безразмерная скорость тепловой волны $\Delta Y/\Delta Z$ стремится к единице, на обжиговой машине, вследствие наличия двух тепловых волн (от газа – теплоносителя из горна и за счет экзотермической реакции окисления магнетита), теплообмен в слое стабилизируется медленнее и только в конце нагревательной части машины. Постепенная стабилизация теплообмена по длине машины облегчает определение длины зоны тепловой инерции и оптимизацию температурно-фильтрационного режима на обжиговой машине.

Максимальный прогрев низа слоя при равном расходе топлива будет достигнут в случае сосредоточения подачи высокотемпературного теплоносителя перед зоной тепловой инерции и в самом ее начале. Это обеспечивает резерв повышения производительности машины и снижения удельного расхода топлива при заданном качестве обожженных окатышей.

Определена количественная взаимосвязь выбросов на трубу и энергоэффективность обжиговых машин. Показано, что соотношение площадей отдельных технологических зон, является одним из основных факторов, определяющим показатели удельного расхода топлива и производительности машины. В первую очередь, это касается первой секции зоны сушки с продувом теплоносителя. Результаты математического моделирования показали, что площадь первой секции сушки имеет оптимум, которому соответствует наименьшая общая продолжительность процесса сушки.

Всесторонняя детальная проработка, включающая изучение физико-химических процессов обжига сырых окатышей с учетом тепловых и геометрических особенностей обжиговой машины, и выполнение перечисленных в статье условий легли в основу разработки принципиально новой теплотехнической схемы отечественной обжиговой машины четвертого поколения, не имеющей аналогов в мире, на которой к настоящему времени достигнуты передовые технико-экономические показатели производства железорудных окатышей по удельной производительности ($1,07 \text{ т/м}^2\text{ч}$), расходу природного газа (не более $10 \text{ м}^3/\text{т}$) и электроэнергии (не более $36 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$), а также минимальные выбросы дымовых газов ($1750 \text{ нм}^3/\text{т}$). При этом обеспечен технологический резерв, необходимый для